

水素の爆発と安全性

三宅 淳巳

横浜国立大学工学部物質工学科

〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5

Explosion Characteristics and Safety Evaluation of Hydrogen

Atsumi MIYAKE

Dept. of Safety Engineering, Yokohama National University

79-5, Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama 240-8501

Although hydrogen is expected as clean energy it potentially has an explosion hazardous nature due to a wide range of explosion limit and a small value of minimum ignition energy. In this paper ignition, combustion, explosion and detonation characteristics of hydrogen-air and hydrogen-oxygen mixtures are presented with their data such as ignition temperature, explosion limit, minimum ignition energy, detonation parameters etc.. Based on these data safety evaluation procedures are described from the point of view of prevention, protection and mitigation of accidental explosions.

1. はじめに

水素はクリーンなエネルギー源として将来益々需要の増加が期待される燃料、エネルギー媒体であるが、一方で、その制御を誤ると爆発火災事故にいたる危険性を有しており、その取り扱いには十分な注意が必要である。実際、古くは石油精製、アンモニア合成時等の爆発事故から、最近では原子炉の異常反応や半導体やバッテリー製造設備等、電子産業での危険性も懸念され、水素の使用環境の多様化に伴って事故の形態も複雑化している[1-4]。爆発とは一般に、「圧力の急激な発生または解放の結果、容器が破裂したり気体が急激に膨張して、爆発音や破壊作用を伴う現象」と説明されるが[5]、爆発をそのプロセス別に分類すると、(1)原子核の分裂、融合などによる核爆発、(2)高圧容器の破裂、水蒸気爆発などの物理的爆発、(3)燃焼、分解、反応暴走などによる化学的爆発のようになる[6]。ここでは水素と酸素（または空気）の化学反応による爆発に限定して述べることにする。

さて、安全性という観点から爆発を考える場合、事故の未然防止（prevention）という立場からはまず爆発の発生条件についての検討が必要である。次に、ひとたび爆発が発生した場合の防護策（protection）についての検討が、そして、爆発による被害の軽減と極小化（mitigation）に関する検討が必要となり、それぞれに対応した評価パラメータを求めることが爆発リスクの低減につながる。

本稿では、水素の燃焼爆発に関する基礎的事項を取り上げ、その特徴と燃焼爆発データを基に、水素の爆発に関する安全について概説する。

2. 燃焼爆発の基礎

2-1 燃焼の三要素

燃焼とはエネルギー放出を伴う酸化反応であり、その反応が起こるためには、燃料、支燃剤となる酸素（または空気）および外部からのエネルギーが必要である。これらを燃焼の三要素と呼び、これらの定量的な関係

を把握し、効果的に制御することにより、不慮の事故を防止すると共にエネルギー源としての有効利用が図られる。

爆発現象の理解には、熱力学、反応速度論、流体力学、移動速度論などが不可欠であるが、これらの他に、物理化学一般を始め、応用物理学、材料力学、伝熱や高温高压化学等に関する広範な知識が必要であり、これらを基にして、反応の生起、伝播に関する特性と、爆発発生時の放出エネルギーの物理的効果に関する挙動の理解を試みることになる。

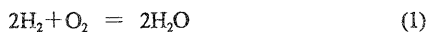
2-2 燃焼と爆発

燃焼は酸化反応によって光や音といったエネルギーを放出する現象で、このこと自体は本質的に爆発も同じであるが、爆発の場合には反応速度がけた違いに大きく、そのためにエネルギー放出速度が大きくなるため、火炎が急速に伝播し、発生する強い圧力や音による破壊現象を伴う場合が多い。また、燃焼爆発の発生には、熱発火（または熱爆発）に関する機構と共に連鎖反応に関する機構が重要な役割を有している。爆発反応には大きく分けて爆燃（deflagration）と爆轟（detonation）があり、特に後者の場合、後述するように、衝撃波を伴って燃焼波が進むため、その破壊的作用は甚大となる。

尚、数ある燃焼反応のなかで、素反応の解析が十分になされ、実験結果と満足な一致が得られる程度に解明されているのは、水素、メタンくらいのものであり、より炭素数の多い炭化水素については現在研究が進められている状況である。

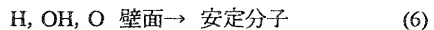
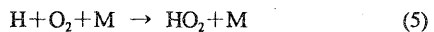
3. 水素と酸素の燃焼反応

水素と酸素の燃焼反応についてはきわめて多数の研究が行われ、発火誘導期の反応機構についてはかなり明確な結論が得られている[7-12]。水素と酸素の化学量論組成混合物の総括反応は

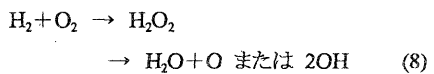
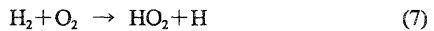


であるが、燃焼波面の火炎帯は高温であるため H₂O

は解離し、これ以外に H₂, O₂, OH, H, O などが存在する複雑な生成物組成となる。火炎帯直後では主反応は終了し、化学平衡が成立していると考えられる。ここにいたるまでの反応には多数の素反応が関与しているが、少なくとも以下の反応を考慮しなければ現象の説明ができない。



これらの内、(2)は連鎖移動反応、(3)(4)は連鎖分岐反応、(5)は気相停止反応、(6)は壁面に衝突して破壊されて安定分子になる表面停止反応である。また、連鎖反応には、



などがあるが、これらの反応速度は遅いため、一旦連鎖反応が開始すると重要ではなく、(2)~(4)の反応が急速に進むため、反応機構から除いてよい。連鎖停止反応である(5)(6)に比べて(3)(4)が速いと連鎖担体である活性化学種（いわゆるラジカル）の濃度が加速的に増加して、ついに爆発に至る。これを連鎖分岐爆発と呼ぶ。

図1に圧力と温度の関数としての酸水素化学量論

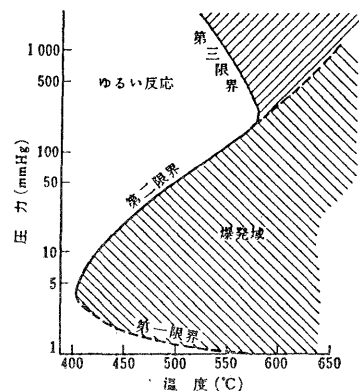


図1 2H₂+O₂混合気の発火限界[8]

組成混合気の爆発限界を示す。酸水素混合気をプラスチックに入れ、ある温度に加熱する。そこで圧力を徐々に下げゆくとある圧力で発火する。これが図中の第二爆発限界である。逆に圧力をあげていき、発火するところが第三限界、また一定温度に加熱したガスを真空中のプラスチックに入れていくとき発火する圧力が第一限界である。この第一限界はきわめて低圧であるので正確には測定しにくい、低圧部でのこの奇妙な突起を爆発半島と呼んでいる。圧力が低い方が発火温度が低くなるという第二限界は、HinshelwoodとSemenovによって

説明され、気相における連鎖反応に関するこれら一連の業績に関して1956年ノーベル化学賞が授与された。

この爆発限界曲線の第一および第二限界については先の(2)~(4)式によって以下のように説明できる。すなわち、低圧においては気相内衝突が少ないため容器の壁による影響を受けやすく、連鎖分岐反応が器壁による連鎖停止反応を上回るときに爆発が生じ、従って(2)~(4)の反応と(6)の反応のつりあうところが第一限界となる。第二限界では圧力の増加は爆発を抑える役割を果たしているが、これは(3)反応による分岐と(5)反応による気相中の失活との競争として理解できる。すなわち、(5)反応は3分子反応で、圧力が増すほど確率は増すが、(3)式による連鎖が3分子反応による連鎖を上回ったときに爆発は生じることになる。尚、第三限界は熱爆発的であり、温度上昇に伴う反応速度の増大により爆発が生じると考えられる。このように、酸水素混合気では、低圧では連鎖分岐反応が、高圧では熱爆発反応が爆発の生起を支配する。

尚、酸水素混合気の燃焼反応については少なくとも20以上の素反応とそれらの反応速度定数を用いなければ、実験データの説明はできないとされているが、詳細については他文献[13]を参照されたい。

4. 爆発の発生

2. で述べたように、爆発特性には爆発の起こり易

表1 可燃性混合気の発火爆発特性値[17-20]

ガス組成	発火温度 [K]	爆発限界		最小発火エネルギー [mJ]
		下限界 [vol.%]	上限界 [vol.%]	
H ₂ -Air	572	4.0	75	0.02
H ₂ -O ₂	560	4.0	94	0.013
CH ₄ -Air	537	5.0	15	0.33
C ₂ H ₆ -Air	472	3.0	12.4	0.31
C ₃ H ₈ -Air	466	2.1	9.5	0.31
C ₂ H ₂ -Air	305	2.5	100	0.02
C ₂ H ₄ -Air	490	2.7	36	0.096

さと発生時の効果があるが、前者についてはその特性値を物質の物理化学的データを基に予測することは困難である。そこで、実験的にデータを蓄積し、それらを用いて対象とする系について評価を行うことが必要となる。ここでは、水素を含む混合気が爆発を生じるための条件として、実験的に得られたパラメータについて紹介する。尚、表1に、水素に関するこれらのパラメータともに、その他の代表的ないくつかの可燃性気体に関する発火爆発特性値を示す。

4-1 発火温度

発火温度または発火点 (Ignition temperature, Ignition point) は他からの火炎、電気火花などの着火源を与えないで、物質を空气中または酸素中で加熱した場合に発火または爆発を生じる最低温度である。熱爆発理論では、「熱発生速度と熱放散速度とがつりあう点」と定義される[14]。従って発火温度は、物質を加熱する容器の表面状態、加熱速度等によって影響を受けることが多く、物質固有の定数であるとは言えない。事実、気体の発火温度の測定には、定容加熱法、定圧流通法、断熱圧縮法などが用いられるが、断熱圧縮法は前二者に比べ、50~100℃程度高い値を与えることが知られている[15]。可燃性気体の発火温度は空気または酸素と混合した場合の濃度が爆発範囲になれば発火せず、従って可燃性混合気の発火温度は混合組成によって異なる値を示し、ある混合比の時に最低

発火温度が得られる。

水素の発火温度は酸素中で 560°C、空気中で 572°C と他の気体に比べて比較的高いとみなされているが、一方、空気中での発火温度は測定方法により 410~860°C と大きな差が生じることが報告されている[16]。これは、測定に用いた容器の材質、内容積、加熱方法等に違いがあるためで、従って、絶対値の取り扱いには注意を要する。

4-2 爆発限界

爆発反応は可燃性ガスの濃度が高すぎても低すぎても爆発せず、可燃性ガスと支燃性ガスがある範囲内の混合組成の場合にのみ伝播していく。この濃度の低い方を爆発下限界 (Lower Explosion Limit : LEL) , 高い方を爆発上限界 (Upper explosion limit : UEL) と呼び、両者の中間を爆発範囲 (Limit of explosion) と呼ぶ。この爆発範囲の中に、さらに爆轟を生じうる爆轟限界 (Limit of detonation) が存在する。

爆発限界も発火温度と同じく測定方法や測定条件によって異なる値を示すが、現在ではアメリカ鉱山局 (U. S. Bureau of Mines) が採用した装置による値

が標準として認知されている。これは直径 5cm、長さ 125~150cm の垂直ガラス管内に混合気を導入し、下部で 1~20mJ のエネルギーの電気火花で点火し、火炎が上方まで伝播した場合に爆発であるとし、組成を変化させて爆発限界を求める方法である[17,18]。水素の空気中での爆発限界は 4.0~75.0vol%、また、酸素中での爆発限界は 4.0~94vol% であるが、これは他の可燃性ガスに比べてきわめて広く、水素の反応性の高さを示している。

爆発限界の値に影響を及ぼす因子として、点火源のエネルギー、測定容器の大きさ、火炎の伝播方向などとともに、測定時の温度、圧力がある。一般に爆発範囲は温度上昇によって広がる。爆発範囲の温度依存性については Bergess-Wheeler の法則があるが、これを修正した Zabetakis らの式が広く知られている[19]。それによると、t°Cにおける下限界 Lt は、25°Cにおける下限界を L25 として以下の式で示される。

$$L_t = [1 - 0.000721(t - 25)]L_{25} \quad (9)$$

この式は上限界についても近似的に適用できるとされている。図2に水素-空気系混合気の爆発限界に及ぼす温度の影響を示す[3,20]。

一方、爆発限界の圧力依存性は温度依存性のようには単純ではなく、一般に飽和炭化水素類の爆発限界は圧力の増加に伴って広がるが、混合系によっては狭

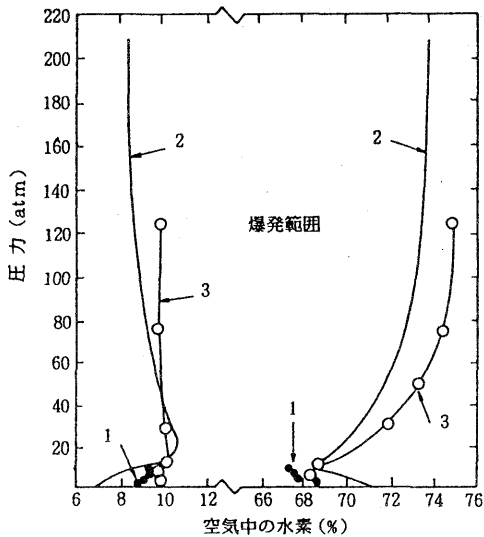


図2 水素-空気系混合気の爆発限界に及ぼす圧力の影響 [18] (1,2:筒状容器の下方伝播、3:球形容器)

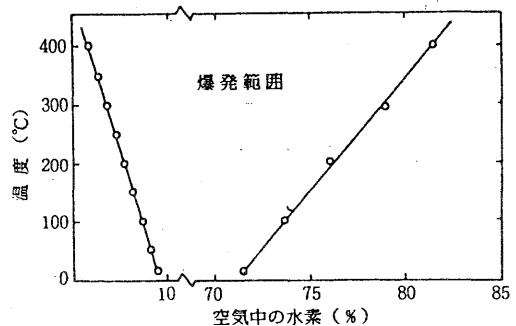


図3 水素-空気系混合気の爆発限界に及ぼす温度の影響[18]

くなるものもあり、複雑な挙動をとる。図3に水素-空気系混合気の爆発限界に及ぼす加圧の影響を示す[3, 20]。圧力の増加に伴って一旦爆発限界は狭くなるが、さらに加圧すると爆発限界は広くなり、やがて圧力には依存しないようになる。

4-3 最小発火エネルギー

最小発火エネルギー (Minimum Ignition Energy : MIE) とは、可燃性混合気や可燃性粉じんのような爆発性物質を発火させるために供給すべきエネルギーの限界値で、発火源となるもののエネルギー値がこの値以下の時には発火しない。最小発火エネルギーは通常、可燃性混合気中で電極間放電した際の電気火花のエネルギーを測定して求めるが、燃焼伝播する火炎面でのエネルギーバランスは、供給されるエネルギー、燃焼により発生する熱、電極や周囲への熱損失を考慮して、下式によって表される[21]。

$$H = \pi d^2 \lambda (T_b - T_u) / S_u \quad (10)$$

ここで、H:最小発火エネルギー、d:電極間距離

λ :熱伝導率、 S_u :燃焼速度、 T_b :火炎温度

T_u :未燃混合気温度

この式により、最小発火エネルギーは、燃焼速度が大きいほど、また、熱伝導率や火炎温度の小さいものほど小さくなるのがわかる。

表1に各種可燃性ガスの最小発火エネルギーを示すが、濃度が29.5vol%の水素の場合、空気中では

0.02mJ程度、酸素中では0.013mJであり、二硫化炭素、アセチレン等とならび、最も発火しやすいガスの一つであると言える。図4に空気中での可燃性ガスの濃度と最小発火エネルギーの関係を示す。このように最小発火エネルギーは混合組成の影響を受け、一般に、化学量論組成付近で最小値を与える。また最小発火エネルギーは温度の増加により著しく減少、すなわち発火しやすくなり、圧力が低くなると増大、すなわち発火しにくくなることが知られている。

4-4 消炎距離

最小発火エネルギーは、火炎の伝播を起こさせるために、ある系に与えられるべきエネルギーの最小量であるが、消炎距離は、火炎が通路を通して伝播できなくなるような最大の通路寸法と定義される。従って、最小発火エネルギーが熱源の幾何学的形状に依存性を有しているのと同様に、消炎距離も通路の幾何学的形状に左右される値である[15,22]。

消炎距離には平板消炎距離、消炎直径、セーフギャップがあるが、いずれも消炎の理由は、燃焼による発生熱量と電極による熱損失のバランスによるものとされ、安全上重要な意味をもっている。水素の平板消炎距離はその最小値として、0.024inchを、実験的最大のセーフギャップ (Maximum Experimental Safe Gap : MESG) として0.011 inchを与えている[23,24]。

5. 爆発の効果

ガス爆発の効果は、爆発に際して放出されたエネルギーの大小、環境条件等によって異なってくるが、一般に、爆発の現象としての衝撃波、爆風、火炎、爆発音等が発生し、その結果として器物の破損、破片の飛散、放射熱等によって評価される。また、爆発の効果については、その形態として、破裂の際の気体の体積膨張、爆燃、爆轟に分けて考える必要がある。

ガス爆発時に放出されるエネルギー等の爆発特性は、爆発反応が終了し、化学平衡と熱的平衡が成立することを仮定すれば、物質の物理化学的データと初期

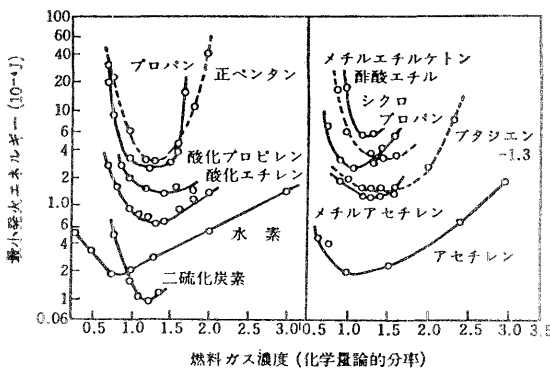


図4 可燃性ガス濃度と最小発火エネルギーの関係[20]

条件を与えることにより、実用上問題のない程度の精度を有する計算予測が可能である。化学平衡計算を実行するためのプログラムとして、NASA の CEC-71 を始め、CHEMKIN, STANJAN 等があり、ガス爆発に関してはいずれも実験値と良好な一致を示すことが知られている。

5-1 気体の膨張

破裂時の爆発の効果は、気体の体積膨張による仕事 (W_e) であるから、これを等温変化を仮定すると、 $PV = \text{const.}$ より、以下の式で表される。

$$\begin{aligned} W_e &= \int PdV = P_1 V_1 \ln(P_1/P_2) \\ &= RT \ln(P_1/P_2) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、添字 1 は圧縮状態、添字 2 は膨張後を表している。しかしこの式から算出されるエネルギーは実際に効果を表すエネルギーの半分程度といわれており、断熱膨張に基づく計算の方が実際に近いとされている [6]。

5-2 爆燃

爆燃 (deflagration) は爆発的な燃焼ではあるが、火炎の伝播速度が媒質の音速以下の状態をいい、一般には数十 cm/sec から 10m/sec 程度である。爆燃時の挙動を表すパラメータとして、断熱火炎温度 (Adiabatic Flame Temperature) や爆発圧力等がある。断熱火炎温度は、燃焼過程の間に熱損失がないときの燃焼ガスの最終温度で、反応終了時の分子種のエネルギー分布が Maxwell-Boltzmann 則に従うとして平衡計算を実行することにより算出することができる。さらにその温度でのモル数の増減から以下の式によって爆発圧力 (P_b) を概算することも可能である [25]。

$$P_b = (n_b/n_0)(T_b/T_0)P_0 \quad (12)$$

ここで、 n_0 , T_0 , P_0 はそれぞれ爆発前のモル数、温度、圧力、 n_b , T_b は断熱火炎温度でのモル数、温度である。実際には熱損失等によりこれより低い値となる。

表 2 に、STANJAN コードを用いた化学平衡計算による可燃性混合気の、各組成における断熱火炎温度

と圧力計算値を示す。断熱火炎温度、発生圧力、いずれも化学量論組成付近で最大値となり、酸水素混合気の場合、 $T_b=3500\text{K}$, $P_b=970\text{kPa}$ 前後となる。一方、常圧、65°C で、内容積 10L の容器中で測定した水素-空気混合気の爆発圧力値は、水素濃度 35vol% において最大値 0.70MPa を示しており [20]、爆燃の場合には、密閉容器内での爆発圧力値は、最大で初期圧力の 7~8 倍となるとされている。

爆発圧力の初期圧力依存性は (12) 式からわかるように比例関係となる。すなわち、初期圧力が 2 倍になれば爆発圧力も 2 倍になる。一方、温度依存性は逆であり、初期温度の上昇に伴って爆発圧力は減少する。これは、初期温度が高い場合には、容器中に存在する物質が相対的に減少してしまうためである。

5-3 爆轟

密閉した管の一端で混合気に点火すると、燃焼が開始し、圧力波が未燃焼ガス中を伝播していく。未燃焼ガスは次々と伝播する圧力波によって圧縮加熱され、高温となった未燃焼ガス中を伝播する波は温度が高まった分だけ速度を増し、先行する波を追い越して衝撃波へと成長し、衝撃波と燃焼波が一体となって進行する爆轟 (detonation) へと発展する。また、強力な点火源を用いることにより、直接的に衝撃波を形成して爆轟を発生させることも可能である。いずれにしろ爆轟は衝撃波 (shock wave) を伴った燃焼波であると表現できる。爆轟波は媒質の音速を越えて伝播するため不連続な圧力分布を有している。衝撃波は伝播に伴って減衰するが、未反応の混合気に入射した衝撃波により化学反応が生起し、その反応によって生成する熱エネルギーが先行する衝撃波にエネルギーを供給することにより定常速度でしかも超音速で伝播する。爆轟波は衝撃波による破壊的效果が著しく、爆燃の場合とは比べものにならない被害をもたらす [1,2]。

爆轟特性値は、熱力学、流体力学から導かれる関係式、気体の状態方程式、エネルギー方程式に、安定爆轟を与えるチャップマン-ジューゲ条件 (C-J 条件) を加えることにより、計算予測することが可能である。

表2 STANJANコードによる水素-空気、水素-酸素系混合気の爆発パラメータ

ガス組成	定容燃焼		爆轟特性値			
	最大圧力 [MPa]	断熱火炎温度 [K]	C-J圧力 [MPa]	C-J温度 [K]	C-J速度 [m/s]	音速 [m/s]
H ₂ : Air=20 : 80	0.671	2204	1.298	2427	1704	971
30 : 70	0.811	2765	1.579	2961	1977	1095
40 : 60	0.783	2639	1.526	2874	2097	1177
50 : 50	0.712	2352	1.382	2598	2177	1241
60 : 40	0.624	2018	1.205	2255	2248	1302
70 : 30	0.521	1647	0.997	1859	2308	1362
H ₂ : O ₂ =20 : 80	0.651	2138	1.259	2349	1595	908
30 : 70	0.794	2718	1.544	2905	1859	1028
40 : 60	0.871	3064	1.698	3238	2083	1140
50 : 50	0.920	3298	1.798	3471	2323	1266
60 : 40	0.955	3457	1.869	3632	2610	1420
66.7 : 33.3	0.969	3504	1.897	3682	2842	1546
70 : 30	0.970	3497	1.900	3676	2970	1616
80 : 20	0.925	3245	1.809	3439	3408	1868

表2に酸水素混合気ならびに水素-空気混合気の爆轟特性計算値を示す。化学量論組成の酸水素混合気の爆轟速度は2842m/sに達し、温度は3682K、爆轟圧力は初期圧力の20倍近い値となる。これらの計算値は化学量論組成付近では実験値と良好な一致を示すが、混合気の組成が爆轟限界付近にあるときには爆轟状態が不安定になり、計算値と異なってくる[26]。尚、水素-空気系混合気の爆轟範囲は18~59vol%、酸水素混合気のそれは15.5~92.6vol%であり、前述した爆轟範囲の内側にある[3]。酸水素混合気の爆轟の特徴は、水素が高濃度になるほど爆轟速度が大きくなることである。これは、水素濃度が高まるにつれ混合気自体の質量が小さくなり、それにより爆轟生成ガスの粒子速度や音速といった爆轟速度を左右する値が大きくなるためである。爆轟は火炎面の乱れや圧力波の反射等により成長し、特に細長い管路やダクト内、あるいは障害物が多くあるところで発生しやすいので、爆轟を発生させないよう、設計時からの注意が必要である。

5-4 爆発エネルギーとその被害

爆発が生じた場合の効果を災害という観点からみると、爆風、飛散物、放射熱、地震動、音などが考えられるが、ここでは主たる被害として、爆風による圧力について述べる。その他については他文献を参照されたい[27]。

爆風は、爆発によって生じる衝撃波と爆発生成ガスによる膨張を総称しており、爆源近傍では両者の作用があるが、少し距離をおくとガスの膨張運動の作用はなくなり、さらに遠方では衝撃波は減衰して音波となる。

爆風については、代表的な爆薬であるトリニトロトルエン(TNT)についての実験、計算が豊富なため、爆発威力を検討する場合、TNTの爆発力を基準とするTNT換算が用いられることが多い。

TNT換算は爆風の効果をTNTの薬量で表現するものであり、爆心からの距離R(m)での爆風圧を $P_m(\text{kg/cm}^2)$ としたとき、爆源のTNT換算量(TNT当

量) : WTNT は次式で与えられる。

$$W_{TNT} = (R/\lambda_m)^3 \tag{14}$$

ここで、 λ_m は P_m に対する換算距離で、実験的に得た関係線図から求めることができる[28]。

ガス爆発の場合、 W_{TNT} は爆発に寄与するガス量 W_G (kg)、ガスの燃焼熱量 Q (kJ/kg)、TNT 収率 γ の関数となり、次式で与えられる。

$$W_{TNT} = W_G Q \gamma / 1000 \tag{15}$$

TNT 収率 γ は、燃焼熱量 Q のエネルギーが爆風のエネルギーに変換する効率を表しており、この効率が TNT 爆発と等しいときに $\gamma = 1$ となる。 γ の値は可燃性混合気の形状、濃度、着火源の強度等の影響を受け、開放空間でのガス爆発事故解析から 0.08~0.16 の範囲にあるといわれている[2,28]。

図5は、TNT爆発の爆風圧と換算距離標準曲線に、爆風被害とピーク圧力の関係をあてはめたものである[29]。

6. 爆発防止対策

爆発リスクの低減には、緒言で述べた段階的な検討が必要であるが、以上に述べた爆発特性データを基に対策検討を行う。以下にその概要を記す。

爆発災害の防止には、まず未然防止を考える。これには燃焼の三要素に相当するものを除外することである。すなわち、支燃性の酸素または空気と、爆発範囲に入るような混合気を作らないことである。爆発範囲は均一に混合されていることが前提であるが、一般の取り扱いでは、混合気は不均一であるため、濃度勾配があり、全体としては爆発範囲外であっても、部分的に範囲内となっている場合が多く、注意が必要である。また、液体水素や固体水素の場合には、固体酸素、固体空気のような酸化性物質と接触、混合しないようにする。もちろん、不活性ガスによる希釈や爆発抑制剤の添加も有効である。

次には、発火源となるような外部からのエネルギーの供給を妨げることである。発火源の種類としては、熱面や電気火花の他に、静電気や触媒となるような第

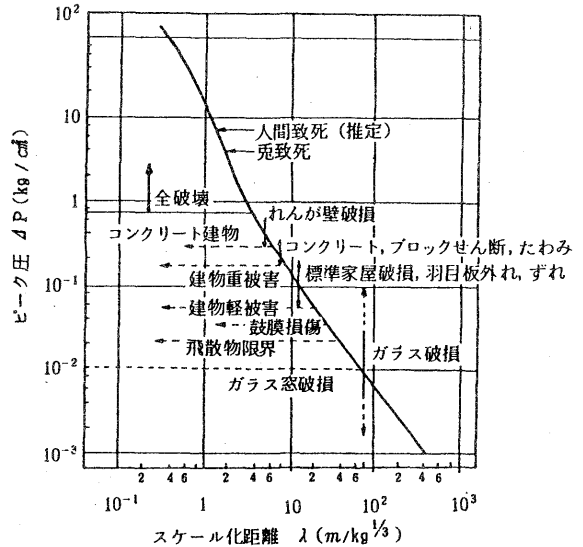


図5 ピーク過圧と爆風被害[29]

三成分の混入、容器壁面との接触も注意が必要である。特に水素を含む混合気の場合、爆発範囲は広く、最小発火エネルギーも小さいため、十分な管理が不可欠である。例えば、電気機器は接点等で電気スパークを発生するので、可燃性混合気が存在する可能性のある場所では、防爆電気機器を使用しなければならない[30]。

一方、防護対策としては、耐圧設計による封じ込め、消火剤等による爆発の抑制、破裂板や放散孔による圧力放散等がある。さらに、大気放出の場合でも、逆火防止器、火炎伝播防止器(フレームアレスタ)、爆轟伝播防止器(デトネーションアレスタ)等があるが、いずれの機器も爆発のような高速現象に対応できるように保守点検を行っておかねばならない。特に、これらの緊急作動装置については高い信頼性を保証するものでなければならず、爆発の発生を検知するセンサも含めた機器、システムの選定が必要である[3,31]。

最後に、ガス爆発の場合は爆薬等の爆発とは異なり、現象の計算予測は十分に可能であるので、事故を想定したシナリオに基づくリスクアセスメントを積極的に採り入れ、事前予測を行い、定量的かつ総合的な評価を行うことが有効である。

7. まとめ

水素の爆発と安全性についてガス爆発の観点から概説した。水素は炭素を含まないクリーンな燃料であるが、その特殊性に鑑み、通常の可燃性ガス以上の注意を払って取り扱う必要がある。特に、爆発範囲および爆轟範囲が広く、発火エネルギーが小さいことから、万一漏洩した場合には容易に着火し、爆発に至る可能性が高いことを十分に考慮した取り扱いをすることが必要である。

参考文献

- 1) 北川徹三:「爆発災害の解析」, 日刊工業新聞社(1980)
- 2) F.P.Lees: “Loss Prevention in the Process Industries (2nd ed.)”, Butterworth-Heinemann (1995)
- 3) 高圧ガス保安協会:「水素保安技術ハンドブック」(1984)
- 4) 上原陽一・小川輝繁監修:「防火・防爆対策技術ハンドブック」, テクニシステム(1994)
- 5) 「理化学辞典(第4版)」, 岩波書店(1987)
- 6) 安全工学協会編:「爆発」, 海文堂(1983)
- 7) N.N.Semenov: “Some Problems of Chemical Kinetics and Reactivity”, Pergamon (1959)
- 8) B.Lewis, G.von Elbe: “Combustion, Flames and Explosion of Gases (2nd ed.)”, Academic Press (1961)
- 9) R.A.ストリーロ(水谷訳):「基礎燃焼学」, 森北出版(1973)
- 10) 疋田強・秋田一雄:「燃焼概論」, コロナ社(1971)
- 11) J.A.Barnard, J.N.Bradley: “Flames and Combustion (2nd ed.)”, Chapman and Hall (1969)
- 12) I.Glassman: “Combustion”, Academic Press (1977)
- 13) 例えば, F.A.Williams(柘植訳):「燃焼の理論」, 日刊工業新聞社(1987)
- 14) 安全工学協会編:「火災」, 海文堂(1983)
- 15) 疋田強監修:「火災・爆発危険性の測定法」, 日刊工業新聞社(1977)
- 16) 北川徹三:「化学安全工学」, 日刊工業新聞社(1969)
- 17) H.F.Coward, G.W.Jones: “Limit of inflammability of gases and vapors”, U.S. Bureau of Mines Bulletin, No.503 (1952)
- 18) M.G.Zabetakis : “ Flammability Characteristics of Combustible Gases and Vapors”U.S. Bureau of Mines Bulletin, No.627 (1965)
- 19) M.G.Zabetakis , S.Lambiris , G.S.Scott : Proc. 7th Int'l Symposium on Combustion, 484, The Combustion Institute (1959)
- 20) 安全工学協会編:「安全工学便覧」, コロナ社(1973)
- 21) 大浦, 駒形:電子科学, 21, 53 (1971)
- 22) 平野敏右:「燃焼学」, 海文堂(1986)
- 23) H.C.Barnett , R.R.Hibbard : “ Basic Consideration in the Combustion of Hydrocarbon Fuels with Air”, Lewis Flight Propulsion Laboratory (1957)
- 24) H.Phillips: Combustion and Flame, 7, 129 (1963)
- 25) F.T.ボダーサ(緒方訳):「爆発防止技術の実際」, 海文堂(1984)
- 26) 松井英憲:産業安全研究所報告, RR-29-3 (1981)
- 27) 例えば, 高山和喜監修:「衝撃波ハンドブック」, Springer-Verlag (1994)
- 28) W.E.Baker , P.A.Cox , P.S.Westine , J.J.Kulesz , R.A. Strehlow : “Explosion Hazards and Evaluation”, Elsevier (1983)
- 29) 疋田強:高圧ガス, 15, 550 (1978)
- 30) 産業安全研究所:「静電気安全指針」, RIIS-TR-78-1 (1978)
- 31) 同上:「工場電気設備防爆指針(ガス蒸気防爆)」, RIIS-TR-79-1 (1979)